

LA REPRODUCTION ARTIFICIELLE

DES

ROCHES VOLCANIQUES

« Neque enim aliud est natura quam ars quædam magna. »

LEIBNIZ, *Protogæa*, IX.

Prise à ses débuts, la connaissance de l'écorce terrestre est tout utilitaire : dans sa première phase, elle nous apparaît comme imposée à l'homme par la nécessité d'explorer les couches du globe, pour en extraire les minerais, les matériaux de construction et les matières combustibles.

Pour quiconque jette un coup d'œil sur l'histoire des sciences, il devient évident qu'elles doivent toutes leur origine à un but utile et pratique ; que toutes ont passé par cette phase initiale pour suivre un développement régulier, dont je vais esquisser la marche pour la géologie.

L'homme commence donc l'exploration des profondeurs terrestres, afin d'y puiser les matières qui doivent servir à ses besoins. D'abord, il le fait sans règle ; mais à mesure que l'art du mineur se développe, la recherche des richesses minérales est poursuivie avec méthode : on observe les conditions dans lesquelles les minéraux et les roches utiles se rencontrent au sein

du globe. D'empiriques et de locales qu'elles étaient à l'origine, ces observations ne tardent pas à se généraliser ; elles permettent alors d'entrevoir quelques-uns des traits saillants de l'architecture de notre planète. En fouillant les entrailles de la terre, on en vient à se convaincre que le globe n'a pas été fait d'un seul coup, qu'il doit sa formation à des époques successives. On s'était proposé d'abord de découvrir des règles pratiques pour le mineur, et l'on est amené graduellement à déchiffrer l'histoire de la terre.

Depuis que, vers la fin du siècle dernier, on commença à appliquer la méthode inductive à l'étude des masses minérales formant l'écorce du globe, à leur architecture et aux êtres dont les débris sont enchâssés dans les terrains, il s'est accumulé un vaste ensemble de documents sur l'histoire de notre planète.

C'est en mettant en jeu cette méthode analytique, en s'appuyant sur l'induction que le géologue interprète la formation des roches. L'observation nous apprend à y distinguer un premier groupe, caractérisé par la disposition en couches ou en bancs : ce sont les roches sédimentaires. Un second groupe, qui ne nous offre point cette disposition stratifiée, comprend les roches de nature volcanique, à structure massive.

Nous voyons les roches sédimentaires s'édifier, lorsque nous observons comment les eaux courantes et la mer roulent et déposent sur leur lit des cailloux, du sable et du limon. Après la mort des organismes qui vivent dans ces eaux, leurs squelettes ou leurs coquilles viennent se mêler aux substances minérales et élever avec celles-ci des couches de sédiments. Ces matières ainsi déposées prennent, par apport successif, la disposition stratifiée. Toutes les particules qui les constituent étaient primitivement des grains isolés et qui portent encore la trace de leur origine : ce sont des débris de roches préexistantes ou des dépouilles

d'organismes que des actions physico-chimiques postérieures peuvent cimenter.

Le second groupe, dont nous aurons à traiter spécialement, comprend les roches massives; celles-ci s'observent, en voie de formation, dans les manifestations volcaniques. Les matières fondues, vomies par les cratères ou injectées dans les couches sédimentaires, se consolident par refroidissement. Les éléments qui constituent les laves sont des individus cristallins, développés aux dépens de la pâte en fusion qui les enchâsse. Ces cristaux ne présentent rien de détritique dans le sens que nous attachions, tout à l'heure, à ce mot. A parler d'une manière générale, la disposition par couches des terrains sédimentaires n'est pas indiquée pour ces masses éruptives : au lieu de l'horizontalité primitive, de la superposition régulière des couches stratifiées, nous avons dans les laves une allure qui indique la poussée de bas en haut, à laquelle elles ont été soumises lors de leur éruption. Enfin, ces roches massives sont dépourvues de débris d'êtres organisés.

Mais tandis que nous voyons se former, sous nos yeux, les roches sédimentaires, que les conditions qui président à leur origine peuvent être suivies d'assez près, que cette œuvre s'accomplit pour ainsi dire tout entière au grand jour, les masses éruptives commencent à s'élaborer dans les profondeurs de la terre; leur genèse est en quelque sorte entourée de mystère, le regard ne peut sonder les vastes réservoirs souterrains, où ces matières en fusion se pétrissent et d'où elles sont projetées lors des éruptions volcaniques.

Pour résoudre les doutes, contrôler et compléter les observations, on tente alors de reproduire artificiellement les roches volcaniques, d'en faire la synthèse. Armé des données de l'observation qui doivent servir de guide, on s'efforce, par des manipulations sa-

vantes, d'imiter les produits de la nature. La science de la terre, d'analytique qu'elle était, entre dès lors dans une dernière phase, celle des expériences synthétiques.

Quoique rapetissés à nos appareils, ces essais d'imiter la nature, conduits par l'intelligence de l'homme, exécutés par ses mains, lui permettent de faire naître des faits analogues à ceux qu'il veut approfondir, de diriger et de surveiller la marche des phénomènes, de se rendre un compte exact de leurs relations et de faire varier à volonté les conditions où ils peuvent se produire. Les connaissances acquises par l'observation, l'analyse et le raisonnement sont ainsi, suivant l'expression de Bacon de Verulam, *soumises au fer et au feu de l'expérience*.

Nous venons d'indiquer à grands traits trois étapes dans la marche des connaissances relatives à l'écorce terrestre. Nous les avons entrevues à leur naissance, au moment où elles se bornaient à des notions utiles pour l'humanité ; nous les avons suivies plus tard, lorsque, se guidant par l'observation et le raisonnement, elles s'élevaient à la hauteur d'une science. La géologie, entrée dans une dernière phase, se transforme aujourd'hui en science expérimentale.

Nous allons montrer, en étudiant la reproduction artificielle des roches volcaniques récentes, quel puissant secours les recherches du laboratoire peuvent apporter à l'observation directe de la nature. Mais avant d'exposer les procédés de la synthèse des roches éruptives contemporaines, nous avons à résumer ce que l'analyse et l'observation des faits ont appris sur la constitution et le mode de formation de ces masses volcaniques. Le point de comparaison des synthèses se trouve dans les laves naturelles ; ce sont des modèles qu'on veut copier : il importe donc de les connaître

par le menu, pour arriver à les imiter dans les détails intimes.

Rappelons donc ce que nous savons des laves et des conditions qui président à leur formation. Nous n'avons pas à nous arrêter ici sur les grandes manifestations des forces internes du globe, ni sur le cortège de phénomènes qui les accompagnent, sur ces éruptions formidables qui ébranlent le volcan jusque dans ses fondements, et projettent des masses vitreuses pulvérisées et des pierres embrasées. Au milieu de ce cataclysme, le cratère et les flancs de la montagne, entr'ouverts sous la poussée des masses éruptives, laissent échapper des flots de laves, qui se déroulent sur les pentes, et s'y solidifient lentement.

Le fait capital de l'éruption, c'est l'émission de la lave et celle des éléments volatils qui, dans les phénomènes volcaniques, joue, pour le moins, un rôle aussi important que les courants de matières fondues. A parler d'une manière générale, on ne peut mieux comparer la lave qu'à un verre liquéfié sous l'influence des hautes températures qui règnent sous l'écorce solide du globe. Les observations directes sur la température de la lave liquéfiée du cratère, faites au moment même de l'éruption, sont entourées de périls que peu d'observateurs ont osé affronter. Aussi ne possédons-nous sur ce point que des indications approximatives. Les volcans où l'épanchement des laves ne dépasse pas un certain degré d'intensité, mais qui sont dans un état d'activité modérée et permanente, comme à l'île Hawaï, ont permis à d'intrépides savants d'approcher assez près du cratère pour tenter d'évaluer la température de la masse liquéfiée. Ils ont pu constater ainsi qu'elle oscille entre 1000° et 2000° C. C'est le lieu de rappeler ici les expériences sur la température de la lave de l'Etna, faites en 1865 par M. Fouqué, en introduisant dans la masse fondue des fils métalliques. Ce sont ces essais

qui ont permis d'obtenir immédiatement dans le laboratoire la température convenable pour la reproduction des feldspaths. Dès que la lave s'épanche, la température baisse rapidement à sa surface; la nappe liquide se recouvre d'une couche plus ou moins épaisse de scories, sous laquelle coule comme un ruisseau de matières fondues qui atteignent encore le point de fusion de l'acier. C'est ce manteau de scories qui empêche le rayonnement et qui permet aux masses, qu'il recouvre, de conserver longtemps une certaine viscosité.

Nous indiquerons plus loin les observations sur les phénomènes de cristallisation qui se passent dans ces matières épanchées, encore fluides ou visqueuses, près de se figer. Voyons tout d'abord quelques-uns des caractères essentiels de la structure et de la composition des laves. Souvent ces produits éruptifs sont bulleux, scoriacés; quelquefois, au contraire, ils se présentent comme une masse vitreuse, homogène, de teinte plus ou moins foncée, où l'œil nu ne distingue aucun minéral isolé. Quelquefois aussi cette masse est comme pétrie de minéraux dont la présence, en nombre plus ou moins considérable, semble refouler la pâte vitreuse qui les cimente. Ces minéraux ainsi empâtés présentent, lorsque leur développement est complet, des formes polyédriques régulières constantes pour chacune des espèces : ce sont des cristaux, c'est-à-dire les individus parfaits du monde minéral. Ils ont puisé dans la masse primitive vitreuse les éléments chimiques qui les constituent et qui se sont groupés suivant leurs affinités, comme on voit s'engendrer, dans un liquide saturé d'un sel, les cristaux dont la substance était dissoute dans l'eau mère.

La minéralogie nous apprend à déterminer les espèces minérales qui cristallisent dans les laves. L'analyse chimique vient à son tour nous fournir de précieuses indications sur la composition des produits

volcaniques. Si l'on traite, par les procédés de la chimie, les roches éruptives, on trouve que toutes contiennent une quantité plus ou moins considérable de silice combinée, qui peut s'élever au delà de 65 pour 100 de la masse : ce sont les laves acides ou légères. On passe ensuite par toutes les transitions aux laves basiques ou lourdes, dont la teneur en silice, diminuant graduellement, n'atteint plus que 55 à 45 pour 100. La silice dont il s'agit n'existe pas à l'état libre dans les laves contemporaines; cette substance y est combinée, sous la forme de silicates, avec l'alumine, le fer, la chaux, la magnésie, la potasse et la soude.

Nous trouvons dans les laitiers de l'industrie métallurgique des produits présentant des analogies intimes avec ceux des volcans, tant au point de vue de la composition que du mode de formation. Ces scories artificielles sont, ainsi que les laves, formées de silicates, et ce qui rapproche encore ces dernières des laitiers, c'est qu'elles doivent être envisagées comme l'écume du noyau métallique interne, dont elles formeraient les zones supérieures. Les différences que nous montre leur composition résulteraient du fait qu'elles nous viennent de zones plus ou moins profondes.

Nos connaissances sur les roches éruptives devaient s'enrichir d'une manière inespérée par l'application du microscope à la lithologie. Nous n'avons pas à rappeler ici les résultats presque merveilleux qu'a permis d'atteindre ce mode d'investigation, inauguré par M. H.-C. Sorby. Pour tout dire en un mot, l'analyse microscopique des roches a changé la face de la pétrographie. Envisageons seulement quelques-unes des notions sur les produits volcaniques récents, révélées par ces nouveaux procédés dont la délicatesse, la sûreté et l'élégance n'ont été surpassées dans aucune autre branche des sciences naturelles. Non seulement ils ont rendu possibles la vérification et le contrôle des hypo-

thèses ; mais ils les ont guidés et fait aboutir aux remarquables découvertes que je vais rappeler.

L'œil, aidé des plus fortes loupes, ne pouvait reconnaître dans les laves que les minéraux cristallisés d'assez grandes dimensions ; l'analyse chimique ne donnait, le plus souvent, que la composition de la masse totale ; la constitution minéralogique n'était qu'entrevue. La texture intime de la roche restait impénétrable ; on ne pouvait se rendre compte d'une manière certaine de l'ordre suivant lequel les éléments de cette masse fondue s'étaient solidifiés, ni se représenter les divers états par où passent les cristaux, leurs ébauches, leurs formes primordiales, leurs squelettes, et l'aspect de la roche à ses différents stades de développement. Appliquons le microscope à l'examen d'un mince éclat de lave, rendu transparent par le polissage. Les laves, avons-nous dit, peuvent être comparées à des masses vitreuses ; mais tandis que dans nos verres artificiels on s'efforce d'obtenir un produit homogène et limpide, les matières liquéfiées des volcans, quand elles arrivent au jour, apportent déjà dans leur masse des éléments différenciés. Le verre qui les renferme doit être considérée comme un résidu de cristallisation où de nombreux individus cristallins ont puisé les éléments qui constituent leur espèce. Dans ces verres volcaniques noirs, brillants, opaques en apparence, dépourvus de toute cristallinité, le microscope découvre un monde de formes minérales. Il nous montre leurs divers états de croissance, leurs arrêts de développement déterminés par la consolidation plus ou moins rapide de la masse. C'est surtout dans les roches qui ont conservé à peu près totalement leur nature vitreuse, homogènes à l'œil nu comme l'obsidienne, qu'on trouve ces cristaux rudimentaires de figure bizarre, premiers pas de la matière amorphe dans son passage à l'état cristallin. Grâce à la rapidité avec la-

quelle la pâte vitreuse s'est figée, les cristaux n'ont pu croître; leur développement a été brusquement arrêté. De là ces embryons de cristaux qui abondent dans les verres naturels et qu'on a désignés sous le nom de *cristallites*.

Des cristallites analogues se produisent dans les laitiers des hauts fourneaux, dont nous indiquions tout à l'heure les relations étroites qui les unissent aux matières laviques. Cette commune origine se traduit par des traits de famille qu'accuse le microscope; les laitiers examinés en lames minces montrent des formes cristallines rudimentaires semblables aux cristallites des verres volcaniques.

Mais, d'ordinaire, les cristaux ne sont pas restés à cet état embryonnaire. Si la lave ne s'est pas trop brusquement refroidie, les mouvements moléculaires conservant leur liberté d'action, même dans une masse semi-liquide, la pâte a pu donner naissance à des individus cristallisés de très petite dimension, les *microlithes*. Ces cristaux microscopiques sont nés au sein de la masse vitreuse pendant qu'elle se consolidait lentement. Malgré leur infinie délicatesse, ces petits polyèdres permettent d'y retrouver, avec une exactitude merveilleuse, tous les caractères propres à des espèces qu'on ne connaissait dans le monde minéral qu'en individus beaucoup plus volumineux, et dont, à coup sûr, on ne pouvait soupçonner la présence dans les laves. Ils forment souvent dans la pâte, par leur enchevêtrement, un admirable réseau cristallin et prêtent à la roche, où ils se sont développés, une structure spéciale, la *structure microlithique*.

Les dimensions toujours microscopiques de ces microlithes, leur agencement, montrent bien qu'ils appartiennent à une période troublée, qu'ils ont été formés à un moment où la lave, encore en mouvement,

se solidifiait ; ils s'en sont séparés pendant l'acte même de l'épanchement ou de l'éruption.

Outre ces cristaux microscopiques et ces groupements de cristallites, qui sont du dernier stade de consolidation, la lave apporte avec elle une provision de cristaux plus grands et de forme plus développée qu'on peut bien souvent distinguer à l'œil nu. Ces derniers ont pris naissance dans des conditions plus calmes, analogues à celles que présente un fluide tranquille où la cristallisation a pu se faire d'une manière lente. Ils se sont formés dans le bain chimique en fusion, alors qu'il était encore renfermé dans les réservoirs souterrains. Cet accroissement lent nous est montré d'une manière évidente par leur disposition en zones concentriques et par leurs dimensions. Ces *cristaux anciens*, apportés tout formés dans la lave, au moment de son éruption, sont enchâssés dans des microlithes ou dans une masse vitreuse. C'est après qu'ils s'étaient développés avec lenteur dans le magma, durant la phase intratellurique, que la masse où ils nageaient a été soulevée. Une période d'agitation a succédé au calme, la lave entraînée avec violence a charrié ces cristaux, les a brisés, corrodés et broyés, les a fondus en partie. Le microscope nous montre nettement les phénomènes que je rappelle. On voit les grands cristaux disloqués, leurs fragments sont dispersés, leurs arêtes émoussées et rongées ; ils sont envahis et pénétrés par la pâte.

Pendant que les actions physiques et chimiques, mises en jeu par le mouvement de la lave, s'attaquent ainsi à démolir les cristaux anciens, naissent les microlithes. Cette matière vitreuse, où flottent les grands cristaux, se prend en un amas d'individus microscopiques. Ceux-ci se rattachent donc à une seconde phase de la cristallisation, ils sont engendrés dans un magma visqueux en mouvement ; leur développement ultérieur

est arrêté par un refroidissement assez rapide qui provoque la prise en masse.

La disposition fluidale des microlithes indique parfaitement d'ailleurs que cette poussée cristalline a été contemporaine du mouvement de la coulée. On remarque, en effet, dans les préparations microscopiques, que les microlithes s'accumulent autour des grandes sections cristallisées; ils ondulent, forment des traînées et présentent cette disposition que les micrographes appellent *structure fluidale*. Elle est accusée par l'orientation de ces cristaux aciculaires infiniment petits. Lorsque ces traînées de microlithes viennent à rencontrer des cristaux enclavés de dimensions plus considérables, ils les contournent, se pressent dans les interstices qui séparent les grandes sections, s'appliquent sur leurs bords et nous offrent le dernier mouvement de la masse au moment même où elle se figea.

Le microscope nous enseigne donc que la cristallisation dans les laves appartient à deux temps; le premier, antérieur à l'éruption, durant lequel les grands cristaux déjà formés nagent dans une masse qu'on peut supposer entièrement vitreuse; au second temps, les microlithes et les formes cristallines embryonnaires s'isolent; ils datent de l'éjaculation, de l'épanchement même, et sont contemporains de la consolidation de la roche.

Ces observations microscopiques sur les cristaux de la seconde phase permettent déjà de conclure qu'ils ont été formés purement et simplement par voie ignée sans qu'on doive faire entrer en jeu des températures ou des pressions hypothétiques, auxquelles on recourait autrefois, sans réclamer un repos absolu qu'on envisageait comme nécessaire pour que des minéraux puissent cristalliser régulièrement. On voit, en effet, les microlithes se former après l'épanchement, à la

pression barométrique, à une température qui est loin d'être aussi élevée qu'on la supposait ; on voit les cristaux naître pendant la marche même de la coulée. Lorsque le refroidissement est très brusque, les microlithes n'ont pas le temps de se former, la matière lavique ne donne naissance alors qu'à des cristallites.

Mais le microscope nous permet de fixer d'une manière plus détaillée encore la chronologie des cristaux des laves ; nous venons de distinguer dans leur histoire deux grandes périodes ; indiquons d'une manière générale comment on peut, en quelque sorte, établir la date à laquelle chacune des espèces de ces deux groupes se sont isolées du verre. Les particularités qui conduisent à la détermination de leur âge relatif, ce sont les inclusions.

Un cristal qui se développe au sein d'une masse vitreuse englobe souvent des particules du milieu dans lequel il croît. C'est ainsi que certaines sections apparaissent au microscope criblées de grains vitreux, emprisonnés à l'intérieur du cristal et souvent disposés suivant les zones d'accroissement. Ces inclusions nous montrent à l'évidence que les cristaux en question sont nés d'une matière vitreuse liquéfiée par la chaleur. Dans d'autres cas, ce sont des espèces minérales qui se trouvent incluses, sous la forme de microlithes, au sein d'un cristal. Il est évident alors que ces microlithes préexistaient au minéral qui les emprisonne.

Dans d'autres cas enfin, sur des cristaux nettement terminés, une espèce vient se mouler, s'appliquer, remplir tous les interstices entre les minéraux déjà formés : ceci montre incontestablement l'antériorité de ces derniers.

En tenant compte de ces faits, qui parlent par eux-mêmes, on est parvenu à dresser des listes chronologiques indiquant, pour chacune des espèces des deux grandes périodes, la date de la cristallisation. Je ne

m'arrêterai pas à vous les citer, mais nous verrons bientôt se dégager par les expériences synthétiques la loi qui préside à la formation successive des cristaux et à leur âge relatif.

J'ai retracé les grandes lignes du tableau qui nous offre l'histoire d'une lave ; je n'ai pu esquisser que certains détails de cette représentation des phénomènes lithologiques que les investigations modernes ont rendus avec une si vivante réalité ; mais ce que nous en avons vu suffit à montrer d'une manière frappante, à mon avis, ce que peut l'analyse secondée par le raisonnement. Je crois ne pas me tromper en avançant qu'à ce point de vue l'étude d'une lave, telle que nous nous sommes efforcé d'en exposer les résultats, présente un des plus beaux exemples de l'application des méthodes inductives aux sciences naturelles : on ne sait pas ce que l'on doit le plus admirer ou des procédés mis en œuvre pour l'analyse, ou de la finesse de l'observation, ou du lien logique avec lequel on a su rattacher tous ces phénomènes.

Pouvoir retracer avec une stricte fidélité dans une masse rocheuse, où l'œil nu ne découvre qu'un amas indistinct et tout d'une venue, la marche de la cristallisation, pénétrer dans cet admirable tissu des produits volcaniques où, dans un centimètre cube, viennent s'agencer des millions de polyèdres, déterminer avec une précision mathématique la nature de chacun de ces corps infiniment petits, les prendre à leur naissance, les suivre jusqu'à leur entier développement, retrouver la trace de toutes les modifications qu'ils ont pu subir sous l'influence des agents physiques et chimiques, voilà ce que ce puissant mode d'investigation, l'analyse microscopique, a permis de réaliser.

Toutefois, pour le chercheur consciencieux et modeste, que de choses restent encore inconnues dans ce champ, en apparence si restreint et déjà si bien fouillé,

de l'histoire des produits volcaniques ! Que de problèmes dont la solution ne peut être donnée même par l'observation la mieux conduite ! Lorsque l'observation ne suffit plus à atteindre ce but, lorsqu'on a épuisé toutes les ressources de ce mode d'investigation, il reste encore celles des expériences synthétiques. C'est un pas de plus dans la voie qui mène à l'intelligence complète des faits et qui peut conduire à des solutions définitives. Mais les opérations synthétiques, pour arriver à ce but, doivent être dirigées avec intelligence et dessein vers la fin qu'on veut atteindre.

Comme l'a dit Sénarmont, l'une des conditions essentielles d'une synthèse géologique, c'est que chacune des opérations artificielles soit compatible avec toutes les circonstances où l'opération naturelle a laissé des traces caractéristiques. Les laitiers et les scories de l'industrie, dont nous avons montré les relations avec certains produits de la nature, sont en réalité des synthèses, mais des synthèses de hasard, qui, malgré le haut intérêt scientifique qu'elles présentent, ne peuvent être mises sur le même pied que les synthèses intentionnelles, dont je vais parler, où l'expérimentateur, tenant en vue le problème à résoudre, s'efforce de réaliser, dans le laboratoire, des conditions identiques à celles qui entouraient la formation des produits naturels qu'on veut imiter.

Dans l'ordre logique, les méthodes synthétiques suivent en quelque sorte les progrès de l'observation et de l'analyse. Cependant on constate que, dès les premiers pas de la géologie, quelques hommes supérieurs entrevoient déjà, avec le coup d'œil du génie, le rôle que l'expérience est appelée à jouer dans cette science. Buffon démontre par des essais que le granite et les principales roches cristallines sont fusibles et qu'elles se transforment par la fusion en matière

vitreuse. Quelques années après, Spallanzani exécute une longue série d'expériences sur la fusion de laves, pour détruire les préjugés qui régnaient sur la cause de la chaleur des matières éruptives.

Mais c'est surtout à sir James Hall que revient l'honneur d'avoir, par des essais restés célèbres, inauguré l'expérience en géologie; il en a démontré l'application d'une manière magistrale et il l'a généralisée. Nous n'avons à envisager dans les travaux de Hall que ceux qui touchent à la synthèse des roches. Vers l'époque où Spallanzani étudiait par les procédés du laboratoire les conditions de formation des laves, l'illustre géologue écossais fondait des roches éruptives dans un récipient en graphite : il observait que le produit de cette fusion, refroidi brusquement, donnait une masse vitreuse amorphe, tandis qu'un refroidissement plus lent y provoquait la formation de cristaux. James Hall avait déjà reconnu par l'expérience ce fait capital pour les synthèses futures, que, pour régénérer les cristaux d'une roche qu'on a fondue, il faut maintenir le verre provenant de la fusion à une température élevée, mais inférieure toutefois à la chaleur à laquelle on a dû recourir pour fondre la roche. Durant ce recuit, certains minéraux peuvent cristalliser. Ces faits sont à mettre en parallèle avec ceux que nous montrent les laves au moment où la température s'abaisse après l'épanchement.

Vers le commencement de ce siècle, Gregory Watt dirige ses recherches dans la même voie : il expérimente sur des masses de basalte de 700 livres, il les fond et les laisse refroidir pendant huit jours sous une couche de charbon qui se consumait lentement. Durant ce recuit prolongé, des concrétions sphérolithiques fibro-radiées, de 6 centimètres de diamètre, s'isolaient dans le verre noir et opaque obtenu par la fusion du basalte; enfin ce verre passait à l'état pierreux,

devenait grenu, se chargeait de lamelles cristallines très minces. En même temps, son magnétisme augmentait et sa densité croissait de 2,743 à 2,949.

Une conclusion des recherches de Watt, qui se rattache par bien des points à celle de Hall que nous venons d'exprimer, c'est que la cristallisation peut se produire dans une période où la matière fondue commence à se solidifier.

Au moment où l'on préparait ainsi les voies de la synthèse des roches, l'analyse et les moyens d'investigation n'avaient pas atteint la perfection qu'elles possèdent aujourd'hui ; d'un autre côté, les préjugés qui régnaient au début de la géologie accumulaient des obstacles qu'on ne devait surmonter qu'un demi-siècle plus tard. Nous n'avons pas à nous arrêter ici sur la brillante période des synthèses minérales dont le début suivit de près l'essor de la chimie et de la minéralogie. Il suffit de citer les noms d'Ebelmen, de Rose, de Mitscherlich, de Sénarmont, de Durocher, de Henri Sainte-Claire Deville et de ses nombreux élèves pour évoquer le souvenir des remarquables résultats de la reproduction artificielle des minéraux. Mais les recherches de ces savants portaient principalement sur la synthèse d'espèces isolées, et non sur les roches, qui sont des agrégats d'espèces minérales. A parler d'une manière générale, leurs expériences étaient surtout d'ordre minéralogique et ne touchaient que secondairement à la lithologie. Toutefois les essais de ces habiles expérimentateurs éclairèrent bien des problèmes géologiques. Ils nous prouvent aussi comment s'est maintenue et accentuée, à mesure que se développaient les sciences minérales, cette tendance qui porte l'intelligence à chercher la compréhension plus complète des phénomènes de la nature par les méthodes expérimentales. Enfin, en 1866, M. Daubrée trace la voie de la reproduction des roches cristallines par fusion simple.

C'est sa méthode qui fut reprise depuis et développée par MM. Fouqué et Michel Lévy. Les recherches de M. Daubrée, auxquelles il est fait allusion ici, sont celles qu'il entreprit pour reproduire par la fusion certaines pierres météoriques caractérisées par l'absence de l'élément feldspathique. Il fondait une roche terrestre, la lherzolite, dont la composition se rapproche des météorites correspondantes, et parvenait à obtenir des produits qui, dans les détails de la structure et de la composition, copiaient ceux des types cosmiques qu'il voulait imiter.

Au moment où cet éminent géologue préludait ainsi aux recherches qui devaient, quelques années après, jeter un si vif éclat sur le laboratoire de géologie du Collège de France, la voie des méthodes synthétiques était encore encombrée par les hypothèses. Ce n'était évidemment plus avec celles relatives à l'influence de forces mystérieuses qu'on avait à lutter ; mais on pensait que la reproduction des phénomènes géologiques dans le laboratoire n'était possible qu'à la condition de pouvoir disposer de temps d'une durée infinie, de températures et de masses dont celles que nous pouvions mettre en jeu ne donnaient pas même l'idée. On supposait encore que les associations minérales de la nature se réglaient suivant d'autres lois que celles des combinaisons que produisait le chimiste. Évidemment, ce ne sont pas ces préjugés qui ont arrêté M. Daubrée dans la route où, par la synthèse des météorites, il avait si vaillamment fait le premier pas. Il est un de ceux, hâtons-nous de le dire, dont les travaux ont le plus contribué à faire disparaître ces hypothèses du domaine de la géologie. Mais les méthodes d'analyse, telles qu'elles existaient alors, ne permettaient pas encore de pénétrer à fond la nature des roches naturelles et de comparer leur structure intime avec celle des produits de la synthèse. Les laboratoires ne possé-

daient pas les appareils au moyen desquels on peut obtenir de très hautes températures en les maintenant fixes pendant le temps prolongé que réclament les expériences.

Les grands progrès réalisés dans la construction de ces appareils et l'application du microscope à la lithologie vinrent enfin permettre d'aborder la reproduction de toutes les roches volcaniques contemporaines. Deux savants français, MM. Fouqué et Michel Lévy, qui avaient introduit dans leur pays la lithologie micrographique, commencent, en 1877, une série d'expériences synthétiques désormais mémorables dans l'histoire de la science. L'un d'eux s'était acquis une juste réputation par ses remarquables travaux sur les phénomènes des volcans, qu'il avait suivis sur place dans les diverses régions classiques; il était familiarisé avec tous les secrets de l'analyse chimique minérale, qu'il a dotée des méthodes les plus ingénieuses et les plus utiles. L'autre, préparé par les fortes études des hautes écoles françaises, avait abordé avec un éclatant succès l'examen des minéraux par leurs propriétés optiques; il avait porté plus avant qu'on ne l'avait fait avant lui l'application des méthodes exactes en micrographie, et s'était fait connaître par ses recherches sur les roches éruptives de la série ancienne.

Dans leurs travaux faits en commun, MM. Fouqué et Lévy avaient en quelque sorte systématisé et coordonné les faits relatifs à la succession chronologique des cristaux des roches éruptives, et révélé un grand nombre des détails que nous avons signalés en exposant les résultats de l'analyse des laves. C'est à cette heureuse association de talents, à cette féconde collaboration que l'on doit les belles découvertes qui ont rendu célèbre le laboratoire du Collège de France et auxquelles c'est un honneur pour moi de pouvoir rendre hommage devant un auditoire chez qui tous les progrès scienti-

liques sont accueillis avec faveur, et de cette tribune, la première au monde pour la diffusion des sciences, où l'immortel Faraday exposait jadis, avec une ardeur généreuse, les admirables travaux de synthèse minéralogique d'Ebelmen.

Nous avons indiqué déjà les données sur lesquelles ces savants devaient s'appuyer dans leurs essais : ce sont celles fournies par l'analyse chimique et minéralogique. Un point, que nous n'avons point encore touché, est la base de leur procédé général. Comme la théorie pouvait le prévoir, les cristaux les plus anciens d'une roche ignée doivent être les moins fusibles. A parler d'une manière générale, c'est d'ailleurs ce qu'on observe : les minéraux du premier temps de la cristallisation sont ceux qui occupent le degré le plus bas de l'échelle de fusibilité. Les espèces constitutives des laves ont apparu à des temps successifs, suivant leur degré de fusibilité, à mesure que la température décroissait. Ces faits, constatés en détail par l'analyse microscopique, ont servi de point de départ aux manipulations de MM. Fouqué et Lévy. Leur procédé repose, d'autre part, sur un fait que James Hall avait entrevu : c'est que la fusion d'une roche produit un verre plus facilement fusible que ne l'est chacune des espèces cristallines constitutives de cette roche. Or, si l'on fond un agrégat naturel de minéraux et qu'on fasse passer le verre, produit de cette fusion, par une série de températures décroissantes, mais toujours supérieures à celle de la fusion de cette masse vitreuse, les minéraux qui peuvent cristalliser de ce magma doivent naître les uns après les autres, et les moins fusibles seront les premiers à s'isoler. Ces cristaux seront englobés, moulés par ceux dont la fusibilité est plus grande, et qui vont apparaître, à leur tour, à mesure qu'on fera décroître la température. Nous avons indiqué plus haut les expériences faites par M. Fouqué sur la tempéra-

ture de la lave en fusion de l'Etna. Ces données ont servi à leur tour de point de départ pour les synthèses. Ajoutons que les savants expérimentateurs ont été, en outre, guidés par des essais faits en projetant brusquement dans l'eau de petites quantités de laves empruntées à une masse en fusion, appartenant à une petite coulée en mouvement. Ces essais avaient été répétés sur des matières prélevées à divers points de la coulée, de manière à montrer la préexistence des grands cristaux et le développement graduel des microlithes, pendant l'épanchement. Il est impossible d'imaginer rien de plus net et de plus saisissant.

Sans insister sur la description technique des appareils, bornons-nous à dire qu'à l'aide des fourneaux et des trompes dont se servent pour leurs synthèses MM. Fouqué et Lévy, on obtient tous les degrés intermédiaires entre le rouge sombre et le blanc éblouissant et qu'on peut maintenir constante une température donnée pendant un temps illimité.

On introduit dans le fourneau un creuset en platine d'une capacité d'environ 20 centimètres cubes, renfermant le mélange de matières minérales que la fusion et les recuits vont transformer en roche. Voici les phases des opérations : d'abord, à l'aide de dispositifs spéciaux, on porte pendant quelque temps la température au blanc éblouissant, le mélange se transforme en verre. En réglant l'admission du gaz et de l'air, en découvrant le fourneau, on fait décroître la température de la masse fondue jusqu'au rouge orangé, point de fusion de l'acier. On soulève ensuite le creuset hors du fourneau, où la température décroît au rouge cerise, point de fusion du cuivre. Enfin si l'on fait sortir complètement le creuset du four, on peut encore le maintenir à une température où le cuivre fondrait, mais difficilement.

Nous avons indiqué les grandes lignes de la marche

de l'opération. Ce sont ces recuits successifs à des températures décroissantes, qui forcent les cristaux à se former en série, à commencer par les moins fusibles qui permettent de donner aux matières fondues soumises à ces manipulations la texture et la composition minéralogique des produits volcaniques.

Nous allons montrer par quelques exemples le mode opératoire des synthèses lithologiques. Suivons d'abord les manipulations pour la reproduction d'une des roches qui jouent le rôle principal dans les éruptions du Vésuve : la leucotéphrite. Cette roche est composée de leucite, de labrador et d'augite.

On forme un mélange de silice, d'alumine, de chaux, d'oxyde de fer, de potasse et de soude, qui répond à une partie d'augite, quatre de labrador, huit de leucite. On introduit ce mélange dans le creuset et on le transforme, au blanc éblouissant, en un verre homogène. Dès que la fusion des éléments chimiques est opérée, on abaisse la température et, durant quarante-huit heures, on maintient la matière vitreuse à la température de l'acier fondu. Les cristaux de leucite s'isolent durant cette première phase de l'opération avec quelques petits cristaux de magnétite et de picotite. Elle répond évidemment au premier temps de la consolidation des roches éruptives.

On maintient de nouveau, pendant quarante-huit heures, la matière à la température de fusion du cuivre; toute la masse, le résidu d'où s'étaient séparés, dans le premier temps, les cristaux de leucite, se transforme en microlithes d'augite, de labrador, en octaèdres de magnétite et de picotite.

Comparons maintenant, après ce double recuit, les préparations microscopiques de synthèse de la lave naturelle; non seulement les mêmes minéraux ont été reproduits par le procédé exclusif de la fusion sèche, mais l'ordre de leur apparition, la proportion des es-

pèces consécutives est identique et cette analogie peut se poursuivre même dans les détails des formes cristallographiques. La leucite en grands cristaux offre toutes les particularités de ce minéral dans les laves vésuviennes; autour d'eux viennent se grouper les microlithes du second temps, l'augite et le labrador. Enfin, comme dans la roche naturelle, la leucite contient des inclusions de fer magnétique et de picotite, qui sont les minéraux les plus anciens.

Prenons comme second exemple la synthèse du basalte, l'un des types les plus répandus de la série volcanique et au sujet duquel bien des hypothèses avaient été avancées pour en expliquer l'origine. On sait que le basalte est composé essentiellement de trois minéraux : l'olivine, l'augite et le labrador. L'olivine, dans la roche naturelle, apparaît en cristaux de la première consolidation.

Comme dans le cas de la leucotéphrite, on forme un mélange d'éléments chimiques ou de minéraux pulvérisés répondant à la composition moyenne d'un basalte riche en olivine. Ce mélange est composé de trois parties de ce minéral, deux d'augite et trois de labrador. On le transforme d'abord en un verre homogène noir. Pendant quarante-huit heures, on le maintient au rouge blanc. Si, après ce recuit à haute température, on examine une lame mince de ce verre, on y observe de grands cristaux d'olivine. Ceux-ci sont encore empâtés dans une masse vitreuse où de petits octaèdres de magnétite et de picotite se sont isolés, ainsi que de rares cristaux d'augite.

Il reste maintenant à faire naître les microlithes de la seconde consolidation, entre lesquels doivent s'enchâsser les cristaux d'olivine que nous venons de voir se développer durant la première phase. A cet effet, on maintient quarante-huit heures le culot à la température du rouge cerise. Après le recuit, on a obtenu la

formation d'une pâte composée de microlithes de labrador et d'augite, de magnétite et de substance vitreuse, résidu de la cristallisation. Dans cette seconde phase, on a donc reproduit la structure microlithique. Ces manipulations donnent naissance à des basaltes qu'on peut à peine distinguer des roches naturelles, et ces quelques grammes de substance, habilement maniés, nous fournissent la preuve la plus convaincante de la formation purement ignée de cette roche.

Nous pourrions exposer ici la remarquable série d'essais exécutés par MM. Fouqué et Lévy, où nous avons pris les deux synthèses qui précèdent. Toutes les roches éruptives contemporaines ont été reconstituées ainsi : les andésites, les labradorites, les basaltes, les limburgites, les néphélinites, les téphrites, les roches à leucite, les péridotites, les labradorites à structure ophitique. Bornons-nous à montrer par un dernier exemple comment ces procédés de synthèse parviennent à éclairer directement les phénomènes éruptifs des périodes du passé du globe.

On avait distingué, sous le nom d'ophites, des roches cristallines anciennes, fréquentes dans les Pyrénées. La période à laquelle remonte leur apparition, et leur origine n'étaient pas établies avec certitude, lorsqu'en 1877 M. Lévy fit voir qu'elles étaient éruptives et qu'elles montraient, au microscope, une structure remarquable qu'il désigna sous le nom de structure ophitique : le feldspath y apparaît englobé par des plages très grandes d'augite. Il semblait donc que ces roches ophitiques fussent des roches ignées dans lesquelles le refroidissement aurait été plus lent que dans les roches ordinaires des éruptions contemporaines. Il fallait, en tentant de reproduire le type ophitique, faire cristalliser l'augite durant une phase nettement séparée de celle où se produirait le feldspath, et donner, en outre, à la première le temps de cristalliser en larges plages. A cet effet, un

mélange d'une partie d'anorthite et d'une partie d'augite fut soumis, après fusion, à un premier recuit, où on le maintint pendant quatre jours à la température de la fusion de l'acier; l'anorthite s'isole, un second recuit de même durée, à la température de fusion du cuivre, amène la cristallisation de l'augite en grandes plages qui moulent l'élément feldspathique, et auquel viennent s'ajouter de petits octaèdres de magnétite et de picotite. L'origine éruptive des ophites et la cause de leur structure étaient donc établies, d'une manière incontestable, par cette remarquable synthèse.

On voit ressortir à l'évidence comment la synthèse parvient à éclairer la genèse des roches, à trancher les discussions qui, jusqu'à ces derniers temps, s'élevaient encore au sujet des principaux types cristallins de l'époque moderne : celles relatives aux basaltes, par exemple, où l'on voulait voir l'eau jouer un rôle important. Or la conclusion générale qui s'impose, après les expériences de MM. Fouqué et Lévy, c'est que le basalte et en général toutes les roches volcaniques des éruptions contemporaines sont de fusion purement ignée.

Mais, à côté de ces magnifiques résultats, ces savants ont eu à enregistrer bien des tentatives infructueuses. Il est utile de les rappeler, pour l'exemple, pour montrer les voies qu'il faut éviter, si l'on veut arriver au but. Ces insuccès circonscrivent le champ des expériences futures et tracent les limites entre lesquelles devront se mouvoir les hypothèses. Ils démontrent, en outre, que les roches, dont on n'a pas réalisé la synthèse par les méthodes mises en jeu, ont été formées dans des conditions différentes de celles où se constituent les produits volcaniques actuels. Cette conclusion, à laquelle l'observation et l'analyse avaient déjà conduit, sans toutefois rien préciser quant aux causes, se trouve donc confirmée par l'insuccès de la synthèse. Si elle a

réussi à refaire de toutes pièces les laves des volcans modernes, elle a échoué à imiter celles qui ont cessé de se produire dans les éruptions contemporaines. On peut dire, d'une manière générale, que, jusqu'ici, toutes les roches acides se sont dérobées aux expériences synthétiques, comme toutes celles qui renferment, parmi leurs minéraux constitutifs, du quartz, du mica, de l'orthose et de la hornblende.

Les procédés de la nature n'offrent point de forces occultes; peut-être qu'en combinant celles dont nous disposons déjà, en les modifiant dans leur application, nous sera-t-il permis de voir réaliser la production de roches qui, jusqu'aujourd'hui, se sont dérobées aux efforts. Cet espoir est établi sur les résultats atteints, qui peuvent servir de présages à de plus surprenants encore. C'est le cas de répéter que les échecs du passé préparent les conquêtes du lendemain.

Je me suis efforcé, dans cette rapide revue des progrès de la synthèse lithologique, de montrer la haute portée scientifique des recherches instituées au laboratoire de géologie du Collège de France; j'aurais pu énumérer encore les synthèses non moins remarquables des minéraux et des météorites que les savants auteurs ou leurs élèves, parmi lesquels M. Bourgeois occupe une place à part, ont su mener à bonne fin. Mais je dois me limiter, et ce que j'ai dit suffit à prouver combien leurs méthodes ont fait avancer nos connaissances dans un domaine de la nature dont l'accès paraissait fermé aux investigations.

Partout où, jusqu'ici, la méthode expérimentale a porté son flambeau, elle a mis en pleine lumière les phénomènes les plus saillants de la science de la terre : il suffit de citer le nom de Daubrée, le descendant direct de ces illustres géologues de l'école écossaise, pour indiquer l'étendue du champ des sciences minérales déjà exploré par les procédés de l'expérience. Tour à

tour ils ont été appliqués avec succès à l'interprétation des dépôts métallifères et des roches métamorphiques, aux phénomènes de trituration et de transport des matières sédimentaires, à l'étude des cassures et des déformations de l'écorce terrestre, de la schistosité des roches, de certains traits de la structure des montagnes.

La géologie, après avoir passé par les phases successives de l'observation et de l'analyse, est donc entrée dans celle de l'expérience et de la synthèse, où l'on s'efforce d'imiter la puissance créatrice de la nature, couronnant ainsi l'édifice scientifique par des procédés qui permettent d'entrevoir l'action des causes dont la connaissance est le but final des sciences physiques et naturelles. C'est ce couronnement de l'œuvre que présentait déjà Leibniz, lorsqu'il écrivait, il y a deux siècles : — « Il fera, selon nous, une œuvre importante, celui qui comparera soigneusement les produits tirés du sein de la terre avec ceux des laboratoires ; car alors brilleront, à nos yeux, les rapports frappants qui existent entre les produits de la nature et ceux de l'art. Bien que le Créateur inépuisable des choses ait en son pouvoir des moyens divers d'effectuer ce qu'il veut, il se plaît néanmoins dans la constance au milieu de la variété de ses œuvres ; et c'est déjà un grand pas vers la connaissance des choses, que d'avoir trouvé, seulement, un moyen de les produire : car la nature n'est qu'un art en plus grand. »



